淡化条件下生物絮团技术对凡纳滨对虾生长与水质的影响

黄海洪[1, §]，李朝云[2, §, †]，类延菊[1,3]，邹万生[1,4]，杨品红[1,5]，武孟祥[6]

（1. 湖南文理学院，常德 415000；2. 山东畜牧兽医职业学院，潍坊 261061；3. 环洞庭湖水产健康养殖及加工湖南省重点实验室，常德 415000；4. 水产高效健康生产湖南省协同创新中心，常德 415000；5. 动物学湖南省高校重点实验室，常德 415000；6. 鼎城区气象局，常德 415000）

摘要：

[目的]为研究淡化条件下生物絮团技术对凡纳滨对虾成虾养殖的影响。

[方法]在5‰盐度条件下，应用200L水体进行普通养殖（对照组）与生物絮团养殖（BFT组），放养密度90尾/m^3，并测定两种养殖方式对虾生长指标与水质指标，以及分析养殖经济效益和污染物减排效果。

[结果]结果显示，经过63d的养殖，BFT组对虾成活率（100%）和生产力（1.32 kg/m^3）显著高于对照组（P<0.05），同时的对虾平均体重（13.20±1.64 g）、特定生长速率（4.26±0.20%/d）和饵料系数（1.09±0.14）等也均优于对照（P>0.05）。

[结论]研究表明，淡化条件下采用BFT养殖凡纳滨对虾能够保持良好的水质，提高成活率，促进生长，降低饵料系数。

关键词：凡纳滨对虾；淡化；生物絮团；生长；水质

分类号：S959

Effect of biofloc technology (BFT) on *Litopenaeus vannamei* growth, water quality and culture benefits in freshwater with low salinity condition

HUANG Haihong[1, §], LI Chaoyun [2, §, †], LEI Yanju[1, 3], ZOU Wansheng[1,4], YANG Pinhong[1,5], Wu Mengxiang[6]

(1. Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China; 2. Shandong Vocational Animal Science and Veterinary College, Weifang 261061, China; 3. Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries, Changde 415000, China; 4. Key Laboratory of Health Aquaculture and Product Processing in Dongting Lake Area, Changde 415000, China; 5. Zoology Key Laboratory of Hunan Higher Education, Changde 415000, China; Dingcheng District Meteorological Bureau, Changde 415000, China)

Abstract:

[Objective]For investigating the effects of biofloc technology (BFT) on commercial culture of adult *Litopenaeus vannamei* shrimp [Methods] as well as environment in inland freshwater with low salinity, the growth performances of shrimp, water quality parameters, economic and environmental benefits were measured for both BFT and control system, by using 200 liters water with a salinity of 5‰ at a density of 90 shrimp per m^3

本文系湖南省教育厅科学研究优秀青年项目“养殖水体低营养条件下芽孢杆菌高效氮转化机理研究与应用”（18B394）的研究成果之一

§ 通讯作者

† 共同第一作者

in the present study.
[Results] Results showed that after a 63-days culture, the survival rate (100%) and productivity (1.32 kg/m^3) of shrimp from BFT system were significantly higher than those of control system, respectively (P<0.05). And other growth performance indices, such as the average individual weight (13.20±1.64 g), special growth rate (4.26±0.20%/d) and feed conversion ratio (1.09±0.14) were also all higher in BFT system compare to control (P>0.05).
[Conclusions] In conclusion, application of BFT in inland culture of *L. vannamei* under low salinity condition not only elevated survival rate, improve growth and reduce FCR of shrimp.
Key words: *Litopenaeus vannamei*; low salinity; biofloc; growth; water quality

凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*），俗称南美白对虾，是我国第一大对虾养殖品种[1]。淡化养殖是凡纳滨对虾养殖的重要方式[2-3]，全球许多内陆地区均有养殖[4-5]，其中也包括我国的一些内陆省份（如湖南省）[1]。在这些地区，主要通过在淡水中添加人工海盐调配所需盐度进行养殖[4, 6]。但是，这无疑也将大量盐分引入内陆养殖水体，并进入内陆水域，对生态环境造成影响。

生物絮团技术（Biofloc technology）是新近发展起来的一种水产养殖技术，主要通过添加外源碳源，提高水体C:N，促进异养细菌的生长，带动无机氮的原位同化和吸收，避免氨氮、亚硝酸氮等的累积，从而在维持良好水质的同时，能够达到减少换水量，甚至零换水的目的，因而可以满足内陆地区进行海水品种养殖的需求[7]，同时降低由此带来的环境风险[8]。根据这个特点，BFT应用于内陆地区凡纳滨对虾的淡化养殖，由于换水量小甚至可以不换水，也将大大降低对生态环境造成的影响。Ray和Lotz[9]研究表明，在10‰盐度条件下应用生物絮团技术养殖凡纳滨对虾，与30‰盐度相比，能够大大减少盐的投入与排放，同时降低养殖成本。但是总体来看，淡化条件下应用BFT对凡纳滨对虾进行淡化养殖的研究仍然非常少。

为此，本研究在淡化条件下应用生物絮团技术进行凡纳滨对虾的养成试验，分析生物絮团技术对养殖水质及对虾生长的影响，以期为凡纳滨对虾生物絮团淡化养殖的实际应用提供基础资料，增强内陆地区凡纳滨对虾养殖产业的环境友好性和可持续性。

1　材料与方法

1.1　试验对虾与暂养

试验所用淡化凡纳滨对虾（0.5 g/尾左右，盐度 5‰）500 尾，购自湖南百浮腾生态农业发展有限公司（湖南常德），在湖南文理学院养殖实验室暂养 2 周。暂养水体用人工海盐（含水率 20%）调整盐度为 5‰，并调整水温、pH、碱度、硬度等水质指标与原始水体相近。使用鼓风机充气增氧，保证溶氧量充足。暂养期间，按照厂家推荐的投饵率表，于每天 08:00 和 16:00 分 2 次投喂对虾饲料（澳华公司，粗蛋白质≥40.0%，粗脂肪≥5.0%，粗纤维≥5.0%，粗灰分≤16.0%，水分≤12.0%），每天换水、吸污，换水量 30%。

1.2　养殖试验

（1）试验设计

往 6 个养殖塑料桶中分别装入 200 L 自来水，用人工海盐（含水率 20%）调整盐度为 5‰，调节水温、pH、碱度和硬度等水质指标与暂养水体相似，二氧化氯消毒（10.0 mg/L），24 h 后用维生素 C（1.0 mg/L）解除毒性，平均分为 2 组，对照组和生物絮团组（BFT 组），每组 3 个重复。

（2）BFT 组生物絮团预培养

养殖试验开始之前 7 天，开始进行 BFT 组生物絮团的培养。首先，对虾饲料（与暂养期间使用的相同）粉碎后过 100 目筛，分别投入 6 个养殖水体，投喂量 6 g/d，分 2 次投喂，08:00 和 18:00。同时加入葡萄糖（食品级，碳水化合物含量 90%，阜丰生物科技有限公司，内蒙古）作为外源碳源，使投入的碳源含碳量与饲料含氮量的比值（C:N）20:1。饲料的碳、氮含量按照文献[10-11]所述方法计算。最终，每投入 1.0 kg 饲料，葡萄糖添加量为 3.6 kg。在此期间，对照组既不投入饲料，也不投入葡萄糖。

（3）对虾淡化养殖

暂养结束时，试验对虾平均体重为 0.88±0.20 g，随机分配到 6 个养殖桶，每个桶 20 尾，放养密度 100 尾/m^3。按照暂养期间的方法投喂饲料，并于投饵 2h 后加入葡萄糖，添加量的计算方法与生物絮团预培养试验相同。养殖试验持续 63 d，期间采用自然光照，并使用气石不间断充气，BFT 组不换水，每周用自来水补充蒸发掉的水量（平均每次补水量为 1.0%），对照组每天吸污，并用 5‰人工海水进行换水，换水率为 20%。养殖过程中有对虾死亡时，根据相关情况及时调整投喂量。

1.3 养殖水质测定

溶解氧、温度、pH 使用 YSI-550A 多功能水质分析仪（YSI 公司，美国）测定，于每天 08:00 和 18:00 各测定一次。其它水质指标 2 周测定一次，水体氨氮、亚硝酸氮、硝酸氮、总碱度、总悬浮颗粒参照国家标准方法[12]进行，生物絮团含量根据 Avnimelech[8]所述方法、用 Imhoff 沉降管（Imhoff cone）测定。水体总菌量也 2 周测定一次，采用平板计数法进行。对照组水质测定的时间以 BFT 组为标准进行设置，即从生物絮团预培养开始计时，加上养殖的 63 d，整个试验共计 70 d，亦即水质的首次测定时间其实是在养殖试验开始后的第 7 天，往后再每两周测定一次。

1.4 对虾生长性能测定

养殖试验结束前 24 h 停止投喂，然后记录存活对虾数量，擦干表面水分，测定体重和体长，分离肠道和肝胰腺，称重，然后按照下述公式分别计算存活率、增重率、特定生长率、肥满度、肠指数、肝胰腺指数、饵料系数和生产力：

存活率(%)=$n_e/n_0\times100$

增重率(%)=$(W_f-W_0)/W_0\times100$

特定生长率(%/d)=$100\times(\ln W_f-\ln W_0)/t$

肥满度(g/cm^3)= $100\times W_f/L^3$

肠指数(%)=$I_w/W_f\times100$

肝胰腺指数(%)=$H_w/W_f\times100$

生产力(kg/m^3)= W_t/V

饵料系数=$F_w/(W_f-W_0)$

式中，n_0 和 W_0 分别为养殖试验开始时放养的对虾数量和体重（g）；F_w、H_w、I_w、L、n_e、W_f 和 W_t 分别为养殖结束时饲料总投喂量（g）、肝胰腺重（g）、肠重（g）、体长（cm）、对虾存活数、体重（g）和对虾总重（kg）；t 为养殖天数（d），V 为养殖水体容量（m^3）。

1.5 数据分析

数据均以平均值±标准差的形式表示，百分数进行反正弦平方根转换，总菌量进行 log10 对数转换，应用 SPSS 22.0 （IBM 公司，美国）软件进行数据正态性检验，之后进行假设检验（student’s T test）。不服从正态分布的数据，则进行非参数检验（Wilcoxon W test）。差异显著性水平设为 P<0.05。

2 结果

2.1 对虾生长

由表 1 可知，经过 63 d 的饲养，BFT 组对虾的平均体重和体长、增重率、特定生长率、肥满度、肝胰腺指数、生产力和饵料系数等均稍优于对照组，但是不显著（P>0.05）。BFT 组对虾成活率为 100%，显著高于对照组（P<0.01）。

表 1 两种养殖系统对虾生长指标

Table 1 Growth indices of shrimp cultured with two different systems

生长指标 Zootechnical parameters	对照组 Control	BFT 组 BFT	P 值 P value
平均体重(g) Average body weight	11.23±0.78	13.20±1.64	0.089
平均体长(g) Average body length	9.41±1.07	9.53±1.37	0.831
存活率(%) Survival rate	88.9±8.17^{b}	100±0.0^{a}	0.001
增重率(%) Weight increase rate	1250±127	1373±180	0.234
特定生长速率(%/d) Special growth rate	4.13±0.15	4.26±0.20	0.269
肥满度(%) Condition factor	1.35±0.39	1.53±0.40	0.088
肠指数(%) Intestine index	5.66±0.78	6.29±1.40	0.437
肝胰腺指数(%) Hepatopancreas index	3.50±1.00	2.55±0.78	0.129
饵料系数 Feed conversion rate	1.26±0.09	1.09±0.14	0.089
生产力(kg/m^3) Productivity	1.00±0.16^{b}	1.32±0.16^{a}	0.010

注：同行无字母表示差异不显著(P＞0.05)，不同小写字母表示差异显著(P＜0.05)。下同。

Notes: In the same row, values with no letter superscripts mean no significant difference (P＞0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (P＜0.05). The same as below.

2.2 养殖水质

（1）水质基本情况

表 2 显示，BFT 组和对照组水体的溶解氧、pH、水温无显著差异（P>0. 05）；BFT 组水体的氨氮、亚硝酸氮、硝酸氮浓度和总菌量均低于对照组（P<0. 01），但是碳酸盐碱度、絮团产量和 TSS 较高（P<0. 01）。

表 2 两种养殖系统水质指标

Table 2 Water quality indices of two different systems

水质 Water quality	对照组 Control	BFT 组 BFT	P 值 P value
溶解氧 (mg/L) Dissolved oxygen	4.81±0.60	4.59±0.50	0.073
水温 (℃) Temperature	22.90±3.24	23.14±3.15	0.431
pH	7.16±0.89^{b}	7.76±0.26^{a}	0.001
碳酸盐碱度 (mg/L $CaCO_3$) Carbonate alkalinity	59.91±7.36^{b}	86.46±2.82^{a}	0.005
氨氮 (mg/L) Ammonia concentration	3.49±0.37^{a}	0.78±0.20^{b}	<0.001
亚硝酸氮 (mg/L) Nitrite concentration	6.48±1.46^{a}	2.26±0.79^{b}	<0.001
硝酸氮 (mg/L) Nitrate concentration	33.08±5.73^{a}	1.88±0.58^{b}	<0.001
絮团产量 (mL/L) Biofloc volume	0.76±0.61^{b}	22.60±2.78^{a}	<0.001
TSS (mg/L)	193.06±43.61^{b}	512.91±78.14^{a}	0.002
总菌量 (×10^5 cfu/mL) Total bacterial counts	1.96±0.27	1.52±0.59	0.250

（2）水质时序变化

水质指标变化趋势见图 1。两组水体溶解氧和水温均呈现下降趋势（图 1a 和图 1b）。对照组水体 pH 下降明显，养殖中后期（28～70 d）pH 均低于 7.00，最低时为 6.14（56 d，图 1c），碳酸盐碱度也有相似的趋势（图 1d），而 BFT 组 pH 和碱度均保持稳定（图 1c 和图

1d）。BFT 组和对照组水体氨氮浓度变化趋势相似，试验前期略有上升，至 28 d 达到峰值，但 BFT 组总体上处于比较低的水平（图 1e）。亚硝酸氮浓度变化趋势与氨氮浓度相似，但是 42 d 才达到峰值（图 1f）。BFT 组水体硝酸氮浓度也一直处于较低水平，但是对照组则持续上升，特别是在 42 d 之后增长幅度非常大（图 1g）。BFT 组在试验前期（7～28 d）快速产生大量生物絮团，之后增长变缓，而对照组在整个试验周期几乎不产生生物絮团（图 1h）。BFT 组的 TSS 一直呈上升趋势，对照组 28 d 之前与 BFT 组相似，但是之后呈下降趋势（图 1i）。两种水体总菌量变化趋势相同，开始均增加，14 d 后下降并最终保持稳定（图 1j）。

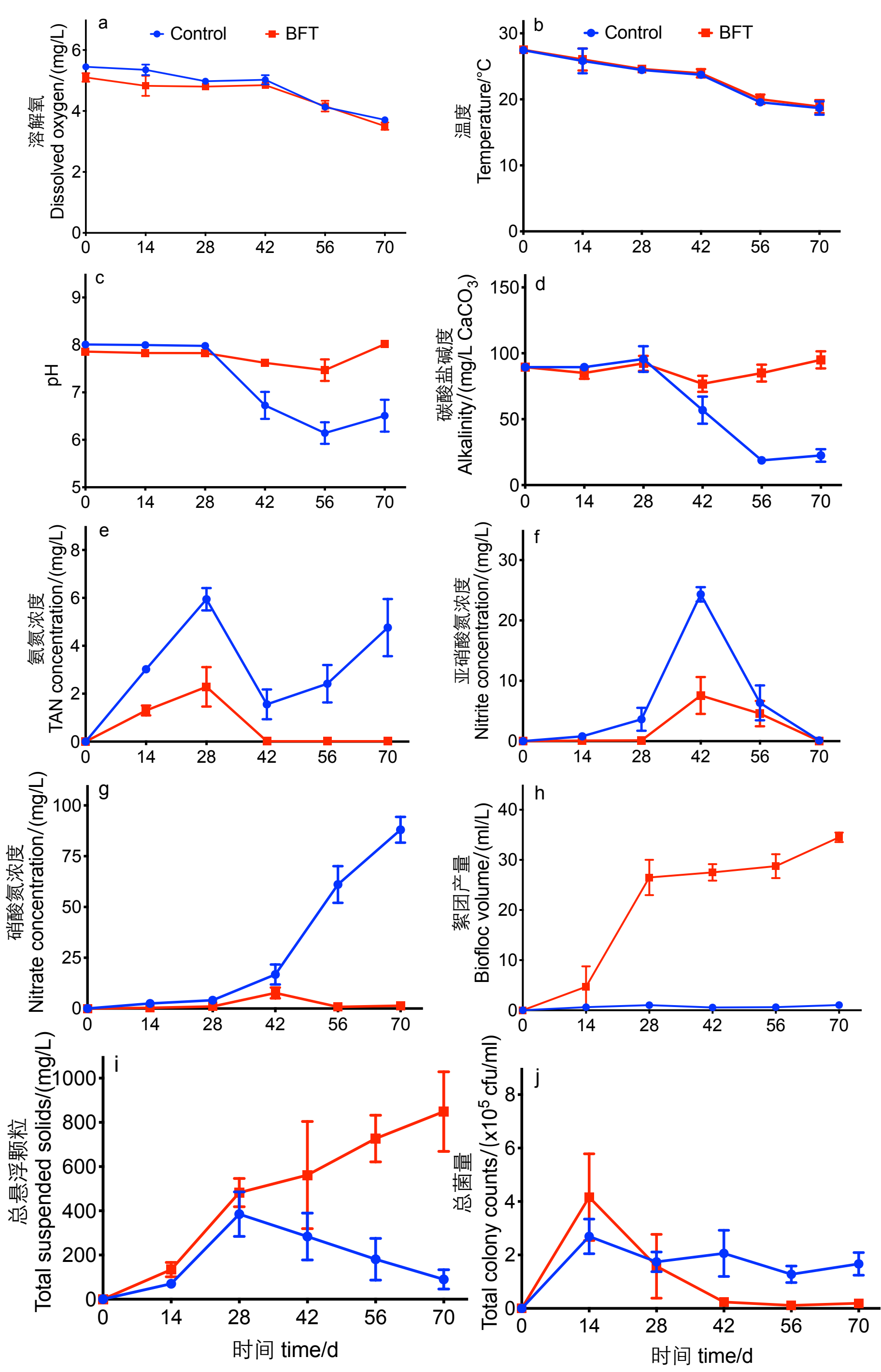


图 1　试验期间两种水体水质变化。试验从 BFT 组生物絮团预培养开始计时，实际养殖 63 d，共计 70 d，对照组也以此为标准设置水质测定的时间。

Fig. 1　Characteristics of water quality indices of two different systems over experimental duration. The duration of experiment was 70d which was timed from the beginning of the 7-days pre-formation for biofloc in the BFT systems followed by a 63-days culture experiment, as well as the control system.

3 讨论

3.1 淡化养殖条件下生物絮团技术对凡纳滨对虾生长的影响

何铜等[14]测量发现，2 月龄凡纳滨对虾平均体重为 1.43 g，体长 4.76 cm，4 月龄达 13.77 g 和 9.93 cm。本试验所用对虾初始体重 0.88 g，与 2 月龄对虾相近，因此推测月龄也在 2 个月左右，经过 2 个月（63 d）的养殖，即约为 4 月龄，体重增长到 12.13～13.20 g，体长 9.41～9.53 cm（表 1），与上述测量相近，说明淡化养殖条件下对虾生长并未受到明显影响。但是 Maicá 等[15]研究发现，BFT 淡化养殖（盐度 4‰）的凡纳滨对虾生长受到了显著抑制，可能与该研究使用小规格仔虾（0.24 g）有关。鳃在对虾渗透压调节方面具有非常重要的作用，而小规格对虾的鳃尚未发育完全[2]，在淡化条件下其生理生化过程可能受到影响，并最终反映在生长上。本次试验所用对虾规格较大（0.88 g），对低盐度的耐受能力较强，生长受到的影响比较小。

与对照组相比，BFT 组对虾的体重、体长、增重率、特定生长率和饵料系数等指标均较好（P>0.05，表 1）。肠指数一定程度上反映了摄食情况，BFT 组对虾肠指数高于对照，这可能与 BFT 组对虾连续摄食生物絮团有关[16-17]。肝胰腺是鱼、虾的主要代谢器官，在营养不良或应激情况下，生理生化过程加快，加重肝胰腺负担，甚至发生病变，如肝肿大、脂肪肝等[18]，同时肝指数或肝体比也会发生变化。因此，肝指数也反映了鱼虾在一定时期内的营养和健康状况。正常情况下肝指数一般为 1%～2%[19]，本次研究 BFT 组对虾肝指数为 2.55%，低于对照组的 3.50%（表 1），表明 BFT 组对虾营养和健康状况较优。另外，肥满度一定程度上也可以反映对虾生长状况，和营养供应水平，一般情况下，营养充足，凡纳滨对虾肥满度为 1%～2%，低于此值说明营养缺乏[6]。本次对照组和 BFT 组对虾肥满度分别为 1.46%和 1.53%（表 1），在正常范围之内，与 Kumar 等[20]的研究结果相似。

BFT 组对虾的大部分生长指标并没有显著优于对照组（P>0.05，表 1）。可能与所使用的碳源有关[21]。Avnimelech[8]认为结构简单的碳源，如葡萄糖[22]等更容易为微生物所利用，更有利于迅速提升水体 C:N，改善水质，却难以为直接为对虾利用，而结构复杂的碳源，如啤酒渣[23]和麸皮[24]等，降解较慢，易被对虾摄食，更有利于生长。在本次研究中，BFT 组所用的碳源为结构简单的葡萄糖，可能促生长作用较弱。因此，需要寻找或开发合适的 BFT 的碳源，包括复合碳源，以促进对虾生长。另外，也可能与水体总悬浮物颗粒（TSS）含量较高有关。TSS 是衡量 BFT 运行效果的重要指标，水体中悬浮颗粒太多，TSS 含量高于 800 mg/L，可能堵塞鳃组织，影响对虾呼吸以及代谢过程，进而抑制对虾生长[25]，TSS 含量为 400～600 mg/L 最适合对虾生长[26]。本试验后期（56～70 d）BFT 组水体 TSS 含量高于最适值（图 1），可能对生长不利，而此时对应于对虾的 3.5～4 月龄，正是增重最快的时期[14]，影响了 BFT 的增重效果。因此，淡化条件下 BFT 养殖凡纳滨对虾需要对 TSS 进行调控。

BFT 组对虾存活率显著高于对照组（P=0.001），与其他研究结果一致[27]。由于对照组对虾死亡发生在试验的第 28～56 天（数据未显示），而此期间水体氨氮浓度很高（图 1e），亚硝酸氮浓度也大幅度提升（图 1f），推测对虾死亡可能与氨氮和亚硝酸氮突变有关。研究发现，氨氮和亚硝酸氮对凡纳滨对虾具有较强的毒性，且随水体盐度的下降而升高，如盐度为 15‰时，两者的安全浓度分别为 2.44 mg/L[28]和 6.1 mg/L[29]。本次研究的盐度水平为 5‰，在 28～56 d 这个时期，对照组水体氨氮最高达 5.9 mg/L（28 d，图 1e），亚硝酸氮浓度最高也达 24.33 mg/L（42 d，图 1f），远远高于安全浓度，因此引起对虾死亡。

3.2 BFT 对凡纳滨对虾淡化养殖水质的影响

本次研究对照组和 BFT 组水体溶解氧、水温都处于可接受范围，差异不显著（P>0.05，表 2）。但是， BFT 组水体 pH 显著高于对照组（P=0.001，表 2）。一般而言，BFT 水体由于微生物大量繁殖，呼吸作用强烈，释放 CO_2，会导致水体 pH 值下降[30]。这可能与对照水

体强烈的硝化和亚硝化作用有关（表 2）。硝化和亚硝化作用需要消耗大量碱度，而水体碱度与 pH 关系密切，碱度降低将导致 pH 下降[31-32]。对照组水体亚硝酸氮、硝酸氮含量非常高，表明硝化和亚硝化作用非常剧烈，将消耗水体碱度，导致水体 pH 下降。一般通过添加生石灰、碳酸氢钠或碳酸钠保持碱度水平并维持 pH 稳定[33]。

按照水体中优势菌的类别，可将 BFT 水体分为 2 类，硝化和亚硝化细菌占优势的化能自养型，以及异养菌占优势的类型[34-36]。由于硝化、亚硝化作用的终产物是硝酸氮，因此自养类型的 BFT 水体将累积大量的硝酸氮[30]。BFT 优势菌的类型可以通过调整 C:N 来调控，低 C:N（9 和 12）有利于自养菌的发展，而高 C:N（15 和 18）则促进异养菌的生长[34]。BFT 组的 C:N 为 20:1，有利于异养生长，因而导致硝化和亚硝化作用较弱，硝酸氮含量低于对照组（表 2），也表明本研究 BFT 组水体可能是异养菌占优势。然而，BFT 组水体总菌量显著低于对照组（$P<0.001$）。研究发现，在有些生物絮团养殖系统中，随着生物絮团的产生，水体中的部分细菌将依附或存在于絮团中[37]，导致养殖后期水体菌量呈现下降趋势[38]。本试验与这些研究结果一致，养殖前期 BFT 组水体总菌量高于对照，后期随着生物絮团的增多，菌量低于对照（图 1j），但是总体而言，BFT 组总菌量低于对照（表 2）。

本研究 BFT 组的絮团产量和 TSS 显著高于对照组（$P<0.01$，表 1），与其它研究结果一致[39]。维持一定水平的生物絮团和 TSS，不仅有利于对虾生长[26]，也能够促进无机氮的转化，如硝化细菌的生长需要基质，以提高硝化效率[40] ，而生物絮团正好提供了这个条件。

3.3 淡化条件下 BFT 养殖凡纳滨对虾水质变化特征

本研究BFT组和对照组水体的溶解氧、温度随着养殖时间的延长而下降，也具有较明显的时序变化特征（图1a和图1b）。水体温度主要受气候变化的影响，本次养殖试验在8月至11月进行，期间气温是逐渐降低的。在养殖中后期，为保证水体温度，关闭了养殖车间门窗，空气不流通，可能导致室内氧气含量较低，增氧效率降低，水体溶解氧含量也逐渐下降，也使溶解氧与时间表现出负相关，同时也提示在养殖过程中鼓风增氧系统应安装在室外。

BFT组水体pH和碱度在整个试验期间均保持稳定水平，但是对照养殖系统的时序变化特征较明显（图1c），尤其是养殖中后期大幅下降，可能与强烈的硝化、亚硝化作用（表2）大量消耗了水体碱度有关（图1d）[31-32]。因此，水体碱度调控是一项重要的生产实践操作[33]，有助于稳定pH。

氨氮、亚硝酸氮和硝酸氮也具有明显的时序变化（图1e-g）。其中，BFT组的3种物质的变化趋势相似，均先升高后下降，但是峰值出现的时间不同，氨氮为28 d，亚硝酸氮和硝酸氮稍后，均为42 d（图1e-g）。按照氮循环途径，有机氮首先经氨化作用降解为氨氮，再通过亚硝化、硝化作用依次转化为亚硝酸氮和硝酸氮。硝化（亚硝化）细菌属于自养细菌，生长速度比较慢[31]，需要较长周期才能建立起稳定的菌群系统，发挥作用，因此3种物质峰值会序贯出现[41]，研究也发现亚硝酸氮浓度在养殖水体中3周以上才开始缓慢上升[8]。硝酸氮可以被异养菌同化，用于菌体蛋白合成与生长，或者通过反硝化作用而被去除[42]。BFT组异养菌的生长比较旺盛[8]，因而本次研究BFT组硝酸氮可能因同化作用而被转化（图1g)。对照水体氨氮具有较明显的波动性（图1e)，亚硝酸氮变化趋势则与BFT组相同（图1f)，但是硝酸氮却一直呈上升趋势，未出现降解，主要是因为异养菌未占优势，硝酸氮的同化作用较弱。硝酸氮累积量较高，也说明了对照组反硝化作用也不强烈，反硝化菌属于厌氧菌（DO<0.5 mg/L）[43]，较高水平的溶氧（表2）可能抑制其生长。

BFT组需要一定时间才能成熟，稳定发挥功能，本研究BFT组的絮团量呈上升趋势，且前期增加较快，28 d后达到成熟，增长趋缓（图1h)，这与Tierney和Ray[30] 23 d的研究结果相似。BFT组水体的悬浮颗粒也一直呈稳定的上升趋势，养殖后期高于800 mg/L（图1i)，可能对对虾生长产生不利影响，需要进行调控[25]。对照组TSS前期也有较大幅度上升，随后下降（图1i)，可能是由于初期饲料颗粒溶散，后期沉降的缘故。

4 结论

在淡化条件（盐度 5‰）下，生物絮团技术（BFT）养殖对虾的成活率和生产力分别为100%和 1.32±0.16 kg/m^3，显著高于对照组（P<0.05），同时对虾的平均体重、特定生长速率和饵料系数分别为 13.20±1.64 g、4.26±0.20%/d 和 1.09±0.14，也均优于对照（P>0.05）。BFT组水质明显优于对照组，pH 和碳酸盐碱度比较稳定，维持在合理水平，且显著高于对照（P<0.01），氨氮和亚硝酸氮等有毒物质的浓度则显著低于对照（P<0.001），在安全浓度范围之内。

参考文献：

[1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M].北京：中国农业出版社, 2019: 1-152.

[2] VAN WYK P,DAVISHODGKINS M,LARAMORE R,et al. Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems[M]. Tallahassee: florida department of agriculture and consumer services, 1999: 1-220.

[3] 周井娟. 中国对虾养殖业发展轨迹及技术变迁[J]. 中国农学通报, 2016, 32(08): 22-29.

[4] ROY L A,DAVIS D A,SAOUD I P,et al. Shrimp culture in inland low salinity waters[J]. Reviews in Aquaculture, 2010, 2(4): 191-208.

[5] SAMOCHA T,LAWRENCE A,COLLINS C,et al. Production of the pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in high-density greenhouse-enclosed raceways using low salinity groundwater[J]. Journal of Applied Aquaculture, 2004, 15(3-4): 1-19.

[6] 麦贤杰,黄伟健,叶富良,等. 对虾健康养殖学[M]. 北京：海洋出版社, 2009: 263-281.

[7] AVNIMELECH Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems[J]. Aquaculture, 1999, 176(3): 227-235.

[8] AVNIMELECH Y. Biofloc technology: a practical hand book, 3rd ed[M]. Baton Rouge, Louisiana, EUA: The world aquaculture society, 2015: 1-258.

[9] RAY A J,LOTZ J M. Comparing salinities of 10, 20, and 30‰ in intensive, commercial-scale biofloc shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production systems[J]. Aquaculture, 2017, 476: 29-36.

[10] HARI B,KURUP B M,VARGHESE J T,et al. Effects of carbohydrate addition on production in extensive shrimp culture systems[J]. Aquaculture, 2004, 241(1-4): 179-194.

[11] KUMAR S,ANAND P S S,DE D,et al. Effects of biofloc under different carbon sources and protein levels on water quality, growth performance and immune responses in black tiger shrimp *Penaeus monodon* (Fabricius, 1978)[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(3): 1168-1182.

[12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法（第四版）[M]. 北京：中国环境出版社, 2002: 258-285.

[13] 黄朝禧. 水产养殖工程学[M]. 北京：中国农业出版社, 2018: 1-291.

[14] 何铜,刘小林,杨长明,等. 凡纳滨对虾各月龄性状的主成分与判别分析[J]. 生态学报, 2009, 29(04): 2134-2142.

[15] MAICÁ P F,BORBA M R D,Jr W W. Effect of low salinity on microbial floc composition and performance of *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles reared in a zero-water-exchange super-intensive system[J]. Aquaculture Research, 2012, 43(3): 361-370.

[16] YEN N N H,THI D C, TORBJÖRN L,et al. Comparative evaluation of Brewer's yeast as a replacement for fishmeal in diets for tilapia (*Oreochromis niloticus*), reared in clear water or biofloc environments[J]. Aquaculture, 2018, 495: 654-660.

[17] DAUDA A B,ROMANO N,CHEN W W,et al. Differences in feeding habits influence the growth performance and feeding efficiencies of African catfish (*Clarias gariepinus*) and lemon fin barb hybrid (*Hypsibarbus wetmorei* ♂ × *Barboides gonionotus* ♀) in a glycerol-based biofloc technology syste[J]. Aquacultural Engineering, 2018, 82: 31-37.

[18] NOGA E J. Fish disease diagnosis and treatment second edition[M]. Ames: Wiley-Blackwell, 2010: 1-538.

[19] 邵俊杰,张世勇,朱昱璇,等. 不同养殖模式对斑点叉尾鮰生长和肌肉品质特性的影响[J]. 水产学报，2017，41(08): 1256-1263.

[20] KUMAR S,PANDEY P K,THEIVASIGAMANI A,et al. Biofloc improves water, effluent quality and growth parameters of *Penaeus vannamei* in an intensive culture system[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 215: 206-215.

[21] PANIGRAHI A,SUNDARAM M,SARANYA C,et al. Carbohydrate sources deferentially influence growth performances, microbial dynamics and immunomodulation in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) under biofloc system[J]. Fish &

Shellfish Immunology, 2019, 86(3): 1207-1216.
[22] SERRA F P,GAONA C A P,FURTADO P S,et al. Use of different carbon sources for the biofloc system adopted during the nursery and grow-out culture of *Litopenaeus vannamei*[J]. Aquaculture International, 2015, 23(6): 1325-1339.
[23] SENA FUGIMURA M M,FLOR H D R,DE MELO E P,et al. Brewery residues as a source of organic carbon in *Litopenaeus schmitti* white shrimp farms with BFT systems[J]. Aquaculture International, 2015, 23(2): 509-522.
[24] VILANI F G,SCHVEITZER R,ARANTES R D F,et al. Strategies for water preparation in a biofloc system: Effects of carbon source and fertilization dose on water quality and shrimp performance[J]. Aquacultural Engineering, 2016, 74: 70-75.
[25] GAONA C A P,ALMEIDA M S D,VIAU V,et al. Effect of different total suspended solids levels on a *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) BFT culture system during biofloc formation[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(3): 1070-1079.
[26] SCHVEITZER R,ARANTES R,COSTODIO P F S,et al. Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 56: 59-70.
[27] DA SILVA B C,JATOBA A,SCHLEDER D D,et al. Dietary Supplementation with Butyrate and Polyhydroxybutyrate on the Performance of Pacific White Shrimp in Biofloc Systems[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2016, 47(4): 508-518.
[28] LIN Y C,CHEN J C. Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* Boone juveniles at different salinity levels[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2001, 259(1): 109-119.
[29] LIN Y C,CHEN J C. Acute toxicity of nitrite on *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles at different salinity levels[J]. Aquaculture, 2003, 224(1): 193-201.
[30] TIERNEY T W,RAY A J. Comparing biofloc, clear-water, and hybrid nursery systems (Part I): Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production, water quality, and stable isotope dynamics[J]. Aquacultural Engineering, 2018, 82: 73-79.
[31] EBELING J M,TIMMONS M B,BISOGNI J J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems[J]. Aquaculture, 2006, 257(1–4): 346-358.
[32] DE LORENZO M A,SCHVEITZER R,DO ESPIRITO SANTO C M,et al. Intensive hatchery performance of the Pacific white shrimp in biofloc system[J]. Aquacultural Engineering, 2015, 67: 53-58.
[33] MARTINS G B,TAROUCO F,ROSA C E,et al. The utilization of sodium bicarbonate, calcium carbonate or hydroxide in biofloc system: water quality, growth performance and oxidative stress of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Aquaculture, 2017, 468: 10-17.
[34] XU W-J,MORRIS T C,SAMOCHA T M. Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system[J]. Aquaculture, 2016, 453: 169-175.
[35] BECERRA-DORAME M J,MARTINEZ-PORCHAS M,MARTINEZ-CORDOVA L R,et al. Production response and digestive enzymatic activity of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) intensively pregrown in microbial heterotrophic and autotrophic-based systems[J]. The Scientific WorldJ ournal, 2012, 2012: 723654-723654.
[36] JUNG J Y,DAMUSARU J H,PARK Y,et al. Autotrophic biofloc technology system (ABFT) using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* positively affects performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Algal Research, 2017, 27: 259-264.
[37] DE SCHRYVER P,CRAB R,DEFOIRDT T,et al. The basics of bio-flocs technology: the added value for aquaculture[J]. Aquaculture, 2008, 277(3): 125-137.
[38] PRAGYAN D,Tandel R S, Bhat R A H,et al. The addition of probiotic bacteria to microbial floc: Water quality, growth, non-specific immune response and disease resistance of *Cyprinus carpio* in mid-Himalayan altitude[J].Aquaculture, 2018, 495: 961-969.
[39] PANIGRAHI A,SARANYA C,SUNDARAM M,et al.Carbon: Nitrogen (C:N) ratio level variation influences microbial community of the system and growth as well as immunity of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in biofloc based culture system[J].Fish & Shellfish Immunology, 2018, 81: 329-337.
[40] BRATVOLD D,BROWDY C L.Effects of sand sediment and vertical surfaces (AquaMatsTM) on production, water quality and microbial ecology in an intensive *Litopenaeus vannamei* system[J].Aquaculture, 2001, 195(1): 81-94.
[41] BROWDY C L,RAY A J,LEFFLER J W,et al.Biofloc-based aquaculture systems. // TIDWELL J H (Ed.). Aquaculture

production systems[M]. Ames: Wiley-Blackwell, 2012: 278-307.
[42] 乐毅全和王士芬.环境微生物学（第二版）[M].北京: 化学工业出版社, 2011: 166-170.
[43] 陈重军,张敏,喻徐良,等.基质浓度对 ABR 厌氧氨氧化反硝化脱氮除碳效能影响及动力学特征[J].环境科学学报, 2018, 38(09): 3552-3560.

(通讯作者: 黄海洪　E-mail:shinkanh@nwafu.euc.cn; 李朝云　E-mail:cyzyli@163.com)

作者贡献声明：

黄海洪，李朝云：提出研究思路，设计研究方案，分析数据，论文起草；

类延菊，邹万生，武孟祥：实验，采样，测定；

杨品红：论文最终版本修订。